

海洋エネルギーを利用した 浮体式海水中リチウム採取システムの開発

湯川 和浩^{*}、高井 隆三^{*}、星野 邦弘^{**}、安藤 裕友^{*}、
前田 克弥^{*}

Development of Extraction System of Lithium Dissolved into Sea Water
Using the Ocean Energy

by

Kazuhiro YUKAWA, Ryuzou TAKAI, Kunihiro HOSHINO, Hirotomo ANDO
and Katsuya MAEDA

Abstract

In recent years, Lithium has been used increasingly as a secondary battery, particularly in the field of electric information device, because of its high energy density and output voltage. However, we import the necessary amount of lithium from foreign countries since there is no available lithium mine in Japan. In order to secure constantly a sufficient amount of lithium in Japan, special attention has been paid to lithium ion dissolved in seawater. A recent estimation indicated that at least 200 billion tons of the lithium ion are dissolved in the whole seawater.

We propose a floating system to extract lithium from seawater using such ocean energies as sea wave and sea current. For three years from 2000 to 2002, we performed several investigations to develop techniques for practical use of the floating system. In this paper, we report the results of our investigations, as the final report toward the practical use.

^{*} 海洋開発研究領域、^{**} 環境・エネルギー研究領域

原稿受付 平成 年 月 日

審査済 平成 年 月 日

目 次

1 . まえがき	2
2 . リチウム採取システムの概要	2
3 . 流動床発生装置の基本特性	3
3 . 1 流動床の発生状況およびフロートと コラムとの相対運動の計測	3
3 . 2 積層部透過流速の計測	4
3 . 3 体積率変化と海水交換時間の計測	4
3 . 4 第3章のまとめ	5
4 . 深海域再現水槽における総合性能評価試験	5
4 . 1 平水中における係留反力の計測	6
4 . 2 潮流中における係留反力の計測	6
4 . 3 波浪中における浮体の運動および 係留反力の計測	6
4 . 4 第4章のまとめ	6
5 . 浮体式海水中リチウム採取システムの 概念設計	7
5 . 1 係留浮体の概念設計	7
5 . 1 . 1 吸着剤積層量および 吸着剤積層部	7
5 . 1 . 2 波力ポンプ構造	7
5 . 1 . 3 その他の構造	8
5 . 2 係留系の概念設計	8
5 . 2 . 1 実験結果の検討	8
5 . 2 . 2 設計張力	8
5 . 2 . 3 浮体側係留点の最大張力	8
5 . 2 . 4 実機の係留系の評価	9
5 . 2 . 5 実機の係留系の費用	10
5 . 3 リチウム採取システム全体の 排水量および重量	12
6 . 浮体式海水中リチウム採取システムによる リチウム採取プロセスの概念および 経済性の検討	12
6 . 1 リチウム吸着技術	12
6 . 1 . 1 リチウム吸着剤の開発状況	12
6 . 1 . 2 リチウム吸着剤の性能想定	12
6 . 2 リチウム脱着技術	12
6 . 3 リチウム採取のプロセスとその構成	13
6 . 4 システム全体の規模と採算性	16
7 . まとめ	16
謝 辞	
参考文献	

1 . まえがき

リチウムは様々な分野で用いられている物質であり、特に近年では、その優れた特性から携帯電話や

ノート型パソコン、PDA を始めとする小型電子情報機器の二次電池としての需要が増えている。ところが、我が国には採掘可能な陸上のリチウム資源が存在せず、全量をアメリカやチリを中心とした輸入に頼っているのが現状であり、資源の安定確保が重要な課題となっている。世界的に見ても、約 1,400 万 t ある経済的採取が可能な陸上のリチウム資源も年間消費量が今後大幅に伸びることを想定すれば、やがて枯渇に近づくと考えられる¹⁾。こうした状況の中で、海水中に約 2,000 億 t 含まれると推定されているリチウムイオンが資源として注目を集めている。この海水中に溶存するリチウムイオンを採取する方法の一つに吸着剤を用いる方法がある。独立行政法人産業技術総合研究所四国センターでは、平成 10 年度より高性能吸着剤の研究を進めており、現状で 1g あたり約 32mg のリチウムイオンを吸着できる粒状吸着剤が開発されている²⁾。

吸着剤にとって理想的な状態は、高濃度のリチウム含有海水と吸着剤が常に均等に混合している流動床状態である。以前、広島大学で開発されたリチウム吸着船では、船側に設置した 48 台のポンプで船体内部に海水を取り入れ、タンク底面のスリットから噴出させることで流動床を形成させた³⁾。しかし、安定した流動床を形成できる反面、48 台のポンプを駆動させるために大量の化石燃料を消費することやポンプの信頼性、荒天時に稼働できないなどの問題点もある。

そこで本研究では、波浪や海流などの自然エネルギーを積極的に利用した全天候型の浮体式リチウム採取システムを提案し、その実用化に向けた技術開発、概念設計およびリチウム採取コスト算出による経済性評価を実施する。

2 . リチウム採取システムの概要

本研究で提案するリチウム採取システムは、流動床発生装置と係留浮体から構成される。図 2-1、表 2-1 に概念図と諸元を示す。流動床発生装置は波浪エネルギーを吸収するフロートと吸着剤積層部に海水を送るための逆止弁付ピストンシリンダからなる。吸着剤は直径 1mm 程度の球形であるため⁴⁾、吸着剤積層部の壁は細かいメッシュ構造（吸着剤の流出防止）にする必要があり、所要の透過流速を得ることが難しい。従って、波浪エネルギーを利用したピストン機構で吸着剤積層部に海水を送り、吸着効率の高い流動床状態を作り出すのが流動床発生装置である。一方、係留浮体は 4 本のコラムからなり、流動床発生装置を支持する。海流で常に新しい海水が供給される沖合を設置海域に想定するため、維持管理や吸着剤回収の期間を除いて 100% の稼働率を確保

し、台風のような厳しい海象条件でも耐えられるような係留浮体が必要になる。ここで、海水温度の高い方が吸着効率が良いという吸着剤の性質や海水交換に必要な流速を考慮し、本システムを黒潮の中(紀伊水道南方沖約100km)に設置することを考え、既存海象データの収集・整理を行った。風と波に関するデータは、当所の公開成果⁵⁾に基づき推算した。すなわち1980年から1989年まで10年間の波浪追算で得られた年間出現頻度分布表を使用し、年最大値の推定には極値統計における極値Ⅰ型(Gumbel分布)を適用した。また、海流速度は海上保安庁水路部がホームページ上で公開している1996年1月から2002年3月までの海流推測図⁶⁾に基づいて推算した。さらに、リチウム採取量推定に必要なデータとして月ごとの有義波高、有義波周期および平均水温の推移を求めた。ただし、有義波高と有義波周期については、当所の公開成果⁵⁾における月ごとの波高・周期出現頻度表を使用して求め、水温については海流と同期間における月ごとの100m層水温水平分布図⁶⁾を使用して求めた。それらの結果を表2-2、図2-2に示す。以上の海象条件下で波浪、海流による浮体の動揺軽減と漂流抑制のため、緊張係留を採用する。

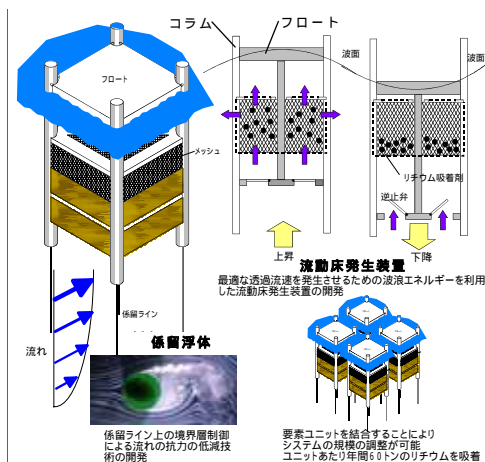


図2-1 リチウム採取システムの概念

表2-1 リチウム採取システムの諸元

フロート平面形状	20 (m) × 20 (m)
コラム平面形状	6 (m) × 6 (m)
コラム深さ	60 (m)
排水量	6,047 (t)
吸着剤積層量	300 (t)
リチウム年間採取目標	60 (t)
設置海域の水深	1,000 (m)

3. 流動床発生装置の基本特性

流動床発生装置の特性はリチウム吸着量と密接な関わりがあり、本研究で提案するリチウム採取システムの骨子と言える。そこで、(1)流動床の発生状況、(2)フロートとコラムとの相対運動の周波数特性、(3)吸着剤積層部の透過流速、(4)吸着剤の体積率変化、(5)海水交換時間、の5点を計測するために模型試験を行った。

3.1 流動床の発生状況および

フロートとコラムとの相対運動の計測

流動床発生装置の部分模型を用いて、当所の2次元水槽(長さ36m、幅1m、深さ2m)で実験を行った。供試模型の諸元を表3-1に示す。ただし、定性的特性の把握を目的としたため、コラムの運動も全て拘束して計測を行った。また、フロートの上下変位に対する抵抗要素として吸着剤の量を考慮し、積層容器の高さ(10cm)に対して吸着剤の積層高さを0cm(吸着剤なし)、1.5cm、3.0cmおよび4.5cmと変化させた。入射波は波高6cm(実機相当2.4m)の規則波とし、波周波数を0.5Hz~1.2Hz(実機相当周期12.6s~5.2s)まで変化させた。

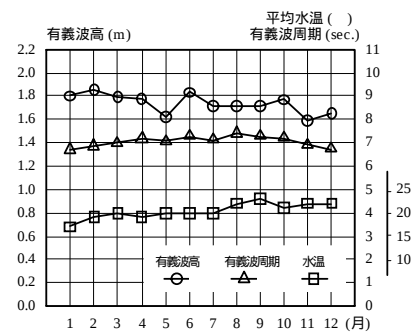


図2-2 月ごとの海象条件

表2-2 想定設置海域の海象条件

風	年平均風速	年最大風速	100年再現風速
	6.49 (m/s)	28.71 (m/s)	43.97 (m/s)
波	年平均波高	年最大波高	100年再現波高
	1.73 (m)	6.39 (m)	9.57 (m)
	年平均波周期	年最大波周期	100年再現波周期
潮流	7.06 (s)	12.50 (s)	15.91 (s)
	年平均流速	年最大流速	100年再現流速
	2.99 (kt)	4.50 (kt)	6.01 (kt)

写真 3-1 に吸着剤積層部を撮影した一例を示す。吸着剤の積層高さが 4.5cm、波周波数をそれぞれ 0.6Hz、0.9Hz、1.2Hz と変化させた場合の結果であり、すべての波周波数において流動床が発生している様子が確認できる。図 3-1 はフロートとコラムとの相対運動の周波数応答関数である。吸着剤の積層量を 0～45%まで変化させた場合を比較しているが、吸着剤の積層量を変化させてもフロートの相対運動に及ぼす影響は比較的小さいことがわかる。

3. 2 積層部透過流速の計測

吸着剤積層部を透過する流れの速度を計測するために、1/40 スケールの全体模型を製作し、当所の海洋構造物試験水槽（長さ 40m、幅 27m、深さ 2m）で波浪中動揺試験を行った。供試模型の概観と主要

表 3-1 供試模型の諸元（2 次元水槽実験）

フロート平面形状	0.36 (m) × 0.5 (m)
フロート型深さ	0.05 (m)
フロート吃水	0.02 (m)
模型吃水	0.38 (m)

表 3-2 1/40 スケール全体模型の主要目

フロート平面形	0.5 (m) × 0.5 (m)
コラム平面形	0.15 (m) × 0.15 (m)
コラム深さ	1.5 (m)

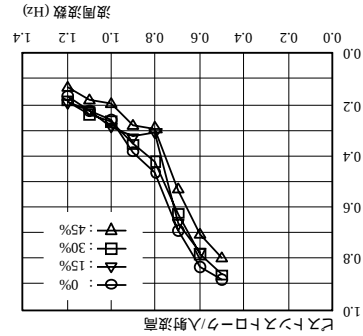


図 3-1 流動床発生装置の応答関数

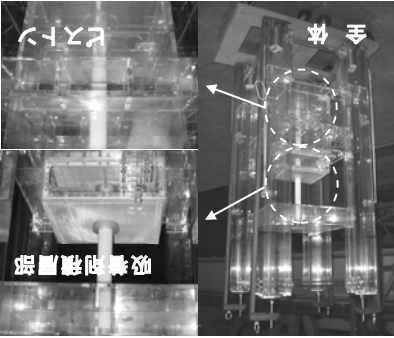


写真 3-2 1/40 スケール全体模型の概観

図 3-2 波浪中動揺試験での応答関数

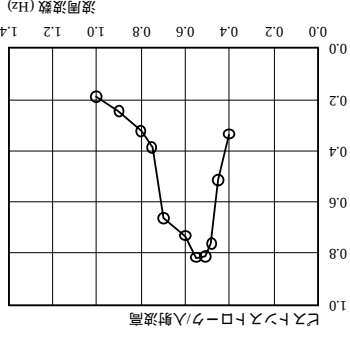


図 3-3 吸着剤積層部の透過流速

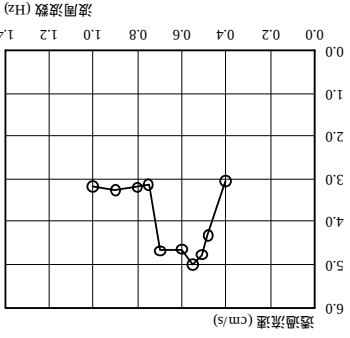
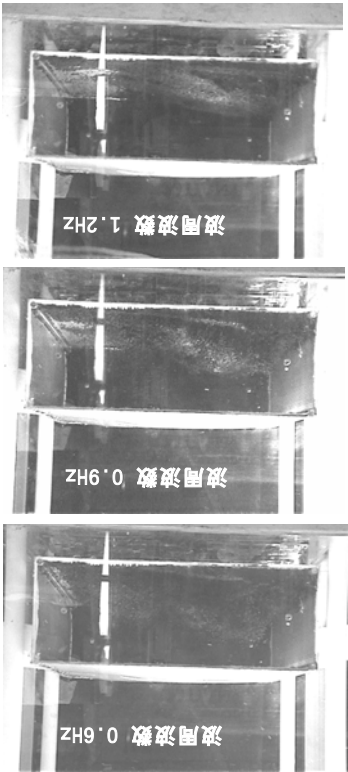


写真 3-1 流動床の発生状況



目をそれぞれ写真 3-2、表 3-2 に示す。吸着剤の積層高さは 5.0cm（積層容器の高さは 10cm）とし、模型の重心高さに合わせた係留点から係留を行った。入射波は波高 5cm の規則波とし、波周波数を 0.4Hz ～1.2Hz（実機の波周期で 15.7s ～5.2s）まで変化させた。図 3-2 はフロートによる相対運動の周波数応答関数を示すが、コラムの運動を拘束した場合（図 3-1）と同様な特性があり、係留浮体の動揺による影響は小さいことがわかる。図 3-3 は吸着剤積層部の透過流速を計測した結果である。ただし、積層部を下から上へ透過する流速のピーク値を平均したものである。図 3-2 に示すフロートの相対運動に比べて若干の傾向が異なるのは、波周波数によって逆止弁の挙動（開度）が異なり、ピストンシリンダ内に取り込まれる流量に差が生じているためである。

3.3 体積率変化と海水交換時間の計測

真鍮の対向電極と交流ブリッジを用いたインピーダンスの変化から吸着剤の体積率を定量的に計測する実験を試みた。供試模型は1/40スケール全体模型で、吸着剤積層部に設置した電極の状況を写真3-3に示す。電極は3対取り付け、上層部と下層部はそれぞれ中層部（吸着剤積層高さ5cmに相当）から2.5cmずつ離れており、各電極の高さ方向の計測範囲はそれぞれ2cmである。また、コラムの運動は全て拘束し、フロートを振幅3.5cmで強制動揺させた。

図3-4は体積率（計測体積に対する吸着剤体積の割合）の変化を示す。ただし、定常状態とみなせる範囲での平均値である。図より、波周波数が0.4Hzより大きくなると吸着剤積層部内の上層部から下層部にかけて、常に流動床が形成された状態になることがわかる。また、図3-5は海水交換時間の計測を行った結果である。実験では、白色ポスターカラーを水で溶かしたものを吸着剤積層部に均等に20ml注入し、フロートを強制動揺しながら、その濁度がなくなるまでの時間を計測した。3次関数でFittingすると、計測結果の傾向を比較的良く捉えることができる。フロートの上下運動の周波数が大きくなる程、吸着剤積層部内の海水が短時間で交換される傾向が良く現れている。

3.4 第3章のまとめ

流動床発生装置の基本特性を調べるために模型試験を行い、以下の結果を得た。

吸着剤積層部では、入射波の波周波数0.55Hz付近で最大5cm/s程度の透過流速が得られ、この時のピストンストロークは入射波高の0.8倍である。吸着剤積層部内の体積率は、上層から下層にかけて流動

床が発生している良好な状態であり（上層10%、中層60%、下層90%）、積層部内の海水交換には90秒を要する。この場合、文献³⁾を参考にして吸着量を概算すると、20日間吸着サイクルで単位吸着剤あたりのリチウム吸着量は6.24mg/g、平均吸着係数は0.008/secとなる。ただし、積層部底面のリチウム濃度を $0.17 \times 10^{-6} \text{g/cm}^3$ 、空気中のかさ密度を 0.24g/cm^3 、拡散係数を $2 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ とし、吸着剤の透過流速には海水交換時間から求めた平均流速を用いた。リチウム採取コストの算出による経済性評価の際には、さらに詳細な検討が必要である。また、透過流速については、実機スケールと比較すると想定設置海域の最頻波周波数に比べて低周波側にピークが現れている。吸着剤の積層量や波の入射角の違いがフロートの相対運動に及ぼす影響は比較的小さいため、コラムの吃水を大きくするか、ピストンシリンダの容積を小さくして付加質量を減らすことで、ピークを高周波側にずらすなどして設計を行うことが望ましい。

4. 深海域再現水槽における総合性能評価試験

前述した実験で流動床発生装置の基本特性が把握できたため、次に当所に新設された深海域再現水槽で総合性能評価試験を行った。深海域再現水槽は水深35mの円形水槽で、全周に128枚の吸収式造波板、水中に平行流を起こす潮流発生装置と昇降床を装備している⁷⁾。供試模型は1/40スケール全体模型とし、実験条件は表4-1に示すように想定設置海域の海象条件（表2-2）に相似となるよう設定した。波の入射角は規則波、不規則波ともに0～45deg.の範囲で15deg.刻みで変化させ、係留は、模型の重心高さに

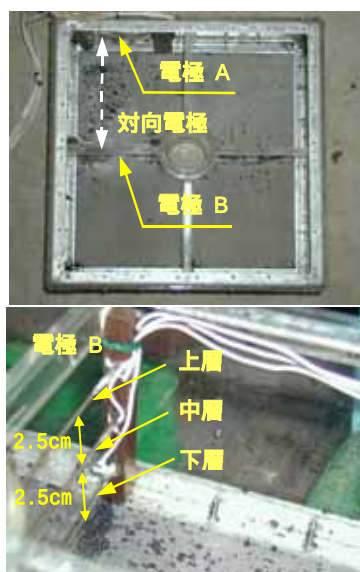


写真3-3 電極の設置状況

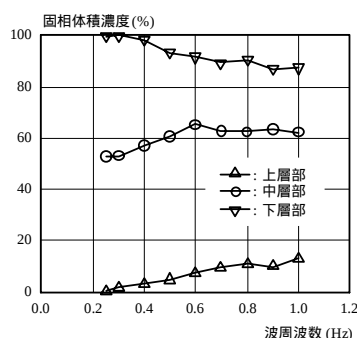


図3-4 体積率の変化

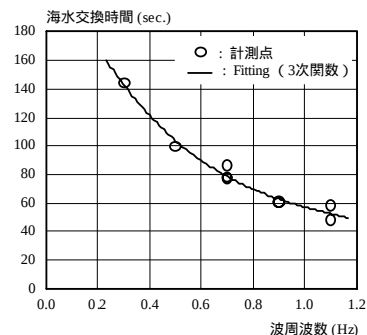


図3-5 海水交換時間の変化

合わせた係留点から水槽の昇降床に設置したアンカーボルトまで直径 1.2mm、索長 25m のワイヤロープで緊張係留した。その際、100 年再現波を受けても緩まないように、各係留索の初期張力を 6.5kgf (吃水の 20% 引き込み) とし、吸着剤の積層高さは 5.0cm とした。模型と計測機器の設置状況を図 4-1 に示す。実験は、(1) 平水中における係留反力の計測、(2) 潮流中における係留反力の計測、(3) 波浪中における浮体の運動および係留反力の計測、の順で実施した。

4.1 平水中における係留反力の計測

係留索の静的な張力特性を調べるために、平水中においてカウンターウェイト試験を行った。実験では、滑車を介して浮体の係留点を水平に引き、荷重に対する浮体の運動と平均係留反力の関係を調べた。計測結果を図 4-2、図 4-3 に示す。図より潮流による定常的な抗力がわかれば、浮体の定常変位と各係留反力が求まる。

4.2 潮流中における係留反力の計測

潮流発生装置のみを稼働させ、各係留反力の変化を計測した。図 4-4 は流速に対する最大係留反力の変化を示す。100 年再現流速時 (実機相当 6.01kt) に、最大係留反力 9kgf (実機相当 576t) が働いた。

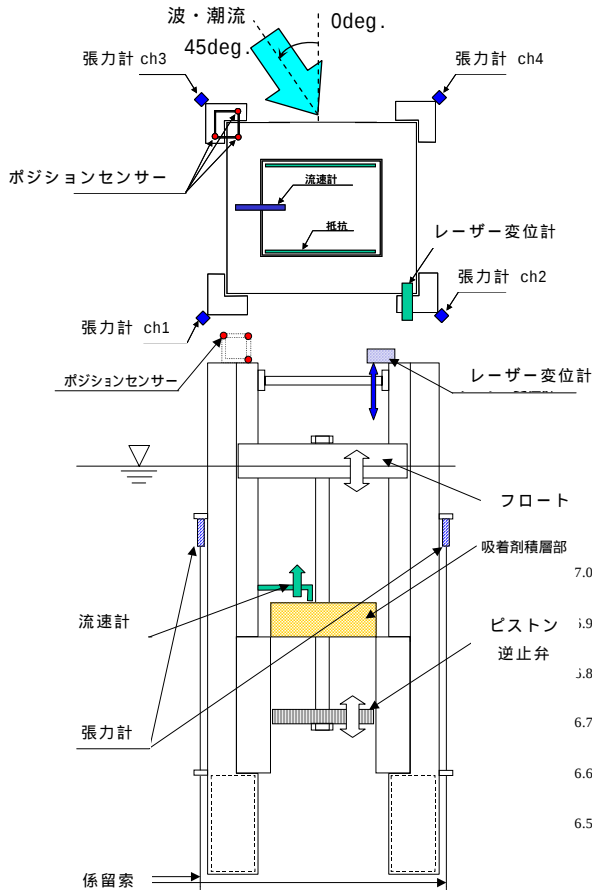


図 4-1 計測機器の設置状況

4.3 波浪中における浮体の運動および係留反力の計測

図 4-5、図 4-6 は平均係留反力の周波数応答関数を示す。張力計 ch3 (ch2 も同様) では入射角の違いによる差は比較的小さく、波周波数が 0.7Hz ~ 0.75Hz 付近でピークが現れる。特に入射角が 45deg. の場合に張力計 ch3 における係留反力が最大となった。図 4-7 は Surge の周波数応答関数を示す。ピークは係留反力と同様に波周波数が 0.7Hz ~ 0.75Hz 付近で現れ、係留浮体の水平移動量は入射波の波高に対する 3 倍以内である。また、図 4-8 にフロートによる相対運動の周波数応答関数を示す。波の入射角の違いがフロートの相対運動に及ぼす影響は、比較的小さいことがわかる。

4.4 第 4 章のまとめ

リチウム採取システムの 1/40 スケール模型を対象とした潮流中および波浪中動揺試験を行い、以下の結果を得た。

浮体の運動については、100 年再現波高時 (23.93cm) の最大値は、Surge が 28.7cm、Heave が 10.1cm、Pitch が 12.0deg. であった。係留反力については、潮流中における実験で、年平均流速時 (12.5cm/s) に 7.1 kgf の平均係留反力が働いた。ここで、供試模

表 4-1 総合性能評価試験の実験条件 (模型スケール)

規則波	入射角	0 (正面)、15、30、45 (deg.)
	周波数	0.5 ~ 1.2 (Hz) まで 0.05 (Hz) 刻み
	波高	4.33 (cm)
不規則波 (ISSC 型)	入射角	0 (正面)、15、30、45 (deg.)
	波高	4.33、15.98、23.93 (cm)
	波周期	1.12、1.98、2.52 (sec.)
潮流	流向	0 (deg.)
	流速	12.5、18.8、25.1 (cm/s)

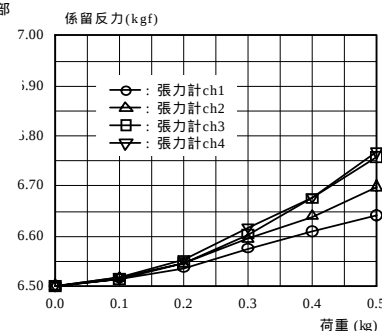


図 4-2 荷重と係留反力の関係

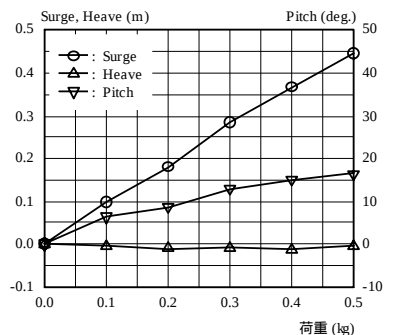


図 4-3 荷重と浮体運動の関係

型の全体抗力係数は0.513であるため、年平均流速時には400g程度の抗力が働く。図4-2に示すカウンターウェイト試験の結果から推定すると、張力計ch3、4の平均係留反力は6.7kgであり、潮流中における実験結果と比較的近い値になることが確認できる。波浪中における実験では、入射波に対する上流側(張力計ch3)と下流側(張力計ch2)は入射角によらず大きな係留反力が働き、左右両側(張力計ch1とch4)は入射角が大きくなる程、係留反力は小さくなる。また、入射角が45deg.の場合に張力計ch3において係留反力が最大となった。係留索1本当たりの初期張力は、実機換算で416tfであり、係留索全体では初期張力が1,664tfとなり、これは排水量6,047tの約1/4に相当する。実機の係留については、概念設計とコスト算出による経済性評価の結果如何で係留索の本数を増やすことも考えられる。

5. 浮体式海水中リチウム採取システムの概念設計

5.1 係留浮体の概念設計

5.1.1 吸着剤積層量および吸着剤積層部

本システムの構造形状決定の出発点は、吸着剤積層量および吸着剤積層部の形状である。設計要件として基本単位としての浮体の吸着剤積層量は約300tと想定した。

信川らの実験³⁾により、リチウム吸着剤積層厚さは2mが流動床として最も効率的であることが分かっている。その厚さで約300tの吸着剤を積層するのに必要な面積は次のように求められる。

$$\begin{aligned} & \text{リチウム吸着剤積層部必要面積} \\ &= \text{リチウム吸着剤見掛け容積} \div \text{積層厚さ} \\ &= (\text{リチウム吸着剤積層量} \\ &\quad \div \text{空気中での見掛け比重}) \div \text{積層厚さ} \\ &= (300\text{t} \div 0.3\text{t/m}^3) \div 2\text{m} = 500\text{m}^2 \end{aligned}$$

積層部の高さは、流動床としての働きを考え積層厚さの2倍とする。これに見合う形状として、積層部の形状は長さ24m×幅24m×高さ4mとした。また、上部と側部に強度部材を持ち、全面を約10mm×10mmのメッシュで囲んだ構造とする。

5.1.2 波力ポンプ構造

上部に波による上下の駆動力を生み出すフロート、下部に海水を吸着剤積層部に送り込むポンプとして働くピストン部、その2つを結ぶピストンロッドおよびシリンダ構造より構成される。

フロートは20m×20m×4mとする。ピストン部は19m×19m×2mとし、ピストンが下降するときは開いて海水のピストン上部への移動を許し、ピストンが上昇するときは閉じて水を押し上げる役割をする逆止弁を全面に装備する。

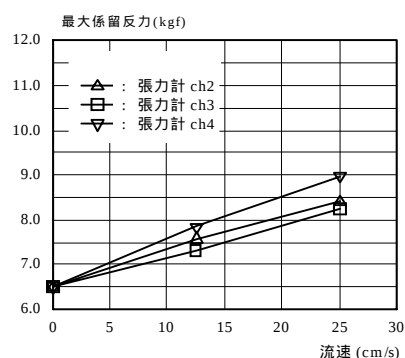


図4-4 流速に対する最大係留反力の変化

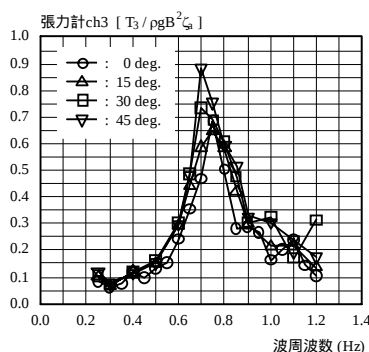


図4-5 張力計ch3の係留反力

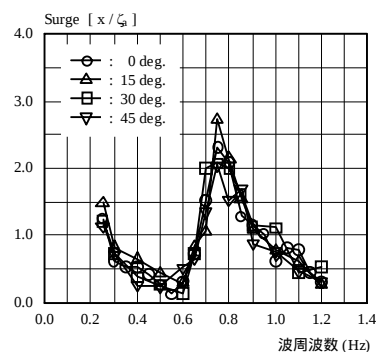


図4-7 規則波中のSurge運動

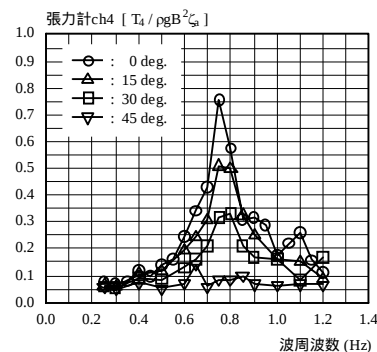


図4-6 張力計ch4の係留反力

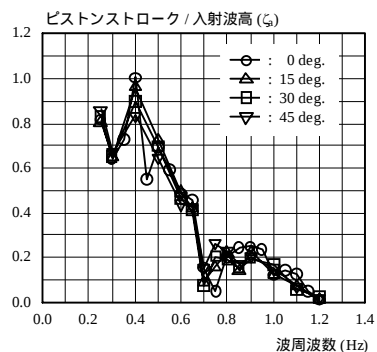


図4-8 規則波中のピストン運動

シリンダ部は、ピストンが波力で上下 20m 移動する間、ピストンシリンダとして作用できるように、上下に 20m×20m の開口を持った高さ 23.5m の四角柱状構造とした。

また、シリンダ部は本浮体の浮力を受け持つタンク構造とし、バラスト水を入れることにより浮体の安定性を確保する。また、この部分のバラスト水の注入および排出により、設置海域までの曳航状態の作成および設置時の喫水調整を可能としている。

5.1.3 その他の構造

波力ポンプの浮体が波により最大 20m の上下動するように四隅に柱状構造をもつ周囲支持浮体構造および機械室等を収容できる上部甲板構造をもつ。

5.2 係留系の概念設計

本節では、第 4 章で述べた深海域再現水槽における総合性能評価試験の結果を基に、浮体式海中リチウム採取システムの実機係留について検討する。

5.2.1 実験結果の検討

潮流と不規則波の共存場での実験結果から、波向 45deg. では Heave と Pitch の連成により図 4-1 の張力計 ch2 と ch3 の張力が大きくなり、最大値も波向 45deg. の張力計 ch3 の値であった。なお、最大値の設計波浪条件は、目標値よりも計測値の波高の方が大きく安全側であったため、計測値の最大値を用いて表 2-2、表 4-1 の 100 年再現状態で設計を行う。

1) 最大値について

実験は 300s の時系列であり、設計条件の有義波周期は 2.52s であるため波の数は 119 である。一般に、時系列中に 100 波程度の波が含まれていれば、有義値の信頼性があるとされている。一方、最大値については、期待値の考え方により次のように考えられる。

実験での波の数は少ないが、設計点では、張力の最大値振幅が有義値の 2.064 倍であり、2,000 波中最大期待値（有義値の 2.022 倍）相当以上の値であった。従って、実験で得られた 313N (31.9kgf) 実機換算で 20.52MN (2,092.6tf) を最大変動張力として係留ワイヤーについて検討する。

2) アンカー点の初期張力について

前述したとおり、本研究で提案するリチウム採取システムの想定設置海域は紀伊半島沖の黒潮の中であり、水深 1,000m ということから通常の鋼管構造ではなく、ワイヤーを用いた係留方法を採用した。テンションレグによる係留装置では、張力がゼロ以下となるスラック状態にならないように初期張力を設定する必要がある。ワイヤーによる係留の場合、ワイヤー自身の水中重量の関係で、浮体側係留点(上

端)よりもアンカー点(下端)の張力が小さくなる。従って、スラック状態に対する判断は、アンカー点初期張力を基に行う。そして、浮体側係留点初期張力は、ワイヤーの自重分付加することにより、アンカー点での設定張力を保つように設計する。実機の設計では、定常力が作用していない波浪による変動荷重下でもスラック状態にならないように初期張力を増やす必要がある。従って、実験で設定した初期張力 63.7N (6.5kgf) に対して定常張力を加えることで 107.9N (約 11kgf) すなわち実機換算(海水比重を考慮)で約 7.076MN (721.6tf) が初期張力となる。

5.2.2 設計張力

1) アンカー点の最大張力

初期張力と最大張力からカラム 1 本当たりのアンカー点最大係留力は、次のように求められる。

$$313\text{N} (31.9\text{kgf}) + 107.9\text{N} (11\text{kgf}) - 63.7\text{N} (6.5\text{kgf}) = 357.0\text{N} (36.4\text{kgf})$$

実機換算(海水比重を考慮)では、約 23.4MN (2,388tf) となる。ここで、実機のワイヤーを選定するために安全率を定める必要がある。ABS と DNV は、動的計算法と準静的計算法での安全率を定めており、安全率は異なるが、各ルールにおける動的計算法の安全率と準静的計算法の安全率の比は等しい。また、他の API、LRS では動的計算法の安全率が示されている。ABS、DNV、API、LRS の動的計算の安全率は 1.5～1.85 である。ABS と DNV の動的計算と準静的計算の安全率の比から準静的計算の安全率を求めると 1.88～3.09 となる。実験で、波の時系列等を変えた繰り返し実験を行って最大値の統計値を求めているので、動的計算の安全率よりも大きい準静的計算の安全率を用いた方が安全性の観点より良いと考えられる。また、「海洋鋼構造物設計指針(案)解説」(土木学会)では、異常時荷重に対して安全率 2.5～3.0 としている。以上のことより、安全側に考えて安全率 3 とすると、一箇所の最大張力は実機換算で 70.3MN (7,164tf) となる。実験で使用したワイヤーを実機換算して、最も近い既存のワイヤーを複数本使用することになると、φ62mm ワイヤーでも 28 本必要になる。ただし、設置およびメンテナンスを考慮した場合、本数を少なくする必要があり、破断荷重が大きい既存のワイヤーを選択する。

その結果、実機係留は、カラム 1 本あたり φ120mm のワイヤー×8 本(1 本あたりの破断荷重 9,930kN (1,010tf))とした。

5.2.3 浮体側係留点の最大張力

浮体側係留点の初期張力は、アンカー点での初期張力にワイヤーの水中重量を付加する。ただし、ア

ンカー一点に比べ、最大張力が増加するため、再度、設計張力が安全率3を確保しているかどうか確認が必要である。 $\phi 120\text{mm}$ のワイヤーの単位長さ当たりの重量は 632.5N/m (64.5kgf/m) であり、海水中では 558.0N/m (56.9kgf/m) である。よって、ワイヤーの海水中重量は、

$$558.0\text{N/m} (56.9\text{kgf/m}) \times 1,000\text{m} \times 8\text{本} \times 4\text{カラム} = 17.85\text{MN} (1,820.8\text{tf})$$

となる。模型実験より求めた必要な初期張力に1カラム分のワイヤーの水中重量を付加する。

$$7.076\text{MN} (\text{約 } 721.6\text{tf}) + 17.85\text{MN} (1,820.8\text{tf}) / 4 = 11.54\text{MN} (1,176.8\text{tf})$$

ここで、1カラム当たりの設計係留力を次のように見直す。

$$20.52\text{MN} (2,092.6\text{tf}) + 11.54\text{MN} (1,176.8\text{tf}) - 4,181.6\text{MN} (426.4\text{tf}) = \text{約 } 27.9\text{MN} (2,843\text{tf})$$

$$(27.9\text{MN} (2,843\text{tf}) \times 3 (\text{安全率})) / 9,930\text{kN} (1,010\text{tf}) = 8.5$$

従って、ワイヤーの水中重量を考慮すると9本必要となる。9本分のワイヤーの海水中重量は、

$$558.0\text{N/m} (56.9\text{kgf/m}) \times 1,000\text{m} \times 9\text{本} \times 4\text{カラム} = 20.09\text{MN} (2,048.4\text{tf})$$

である。

模型実験より求めた必要な初期張力に1カラム分のワイヤーの水中重量を付加する。

$$7.076\text{MN} (\text{約 } 721.6\text{tf}) + 20.09\text{MN} (2,048.4\text{tf}) / 4 = 12.1\text{MN} (1,233.7\text{tf})$$

ここで、1カラム当たりの設計係留力を次のように見直す。

$$20.52\text{MN} (2,092.6\text{tf}) + 12.1\text{MN} (1,233.7\text{tf}) - 4,181.6\text{MN} (426.4\text{tf}) = \text{約 } 28.4\text{MN} (2,900\text{tf})$$

$$(28.4\text{MN} (2,900\text{tf}) \times 3 (\text{安全率})) / 9,930\text{kN} (1,010\text{tf}) = 8.6$$

従って、ワイヤーの海水中重量を考慮すると1カラムあたり9本必要である。

以上の手順で設計した結果、係留系は $\phi 120\text{mm}$ のワイヤー9本となった。また、実機設計による張力は次の通りである。

- ・浮体側係留点初期張力
 $12.1\text{MN} (1,233.7\text{tf}) / 9\text{本} = 1.34\text{MN} (137.1\text{tf})$
- ・浮体側係留点設計張力
 $85.3\text{MN} (8,701\text{tf}) / 9\text{本} = 9.48\text{MN} (966.7\text{tf})$
- ・アンカー点初期張力
 $7.765\text{MN} (721.6\text{tf}) / 9\text{本} = 0.786\text{MN} (80.2\text{tf})$
- ・アンカー点設計張力
 $70.3\text{MN} (7,164\text{tf}) / 9\text{本} = 7.81\text{MN} (796\text{tf})$

なお、設計の結果、実機では初期張力が1カラムあたり

$$12.1\text{MN} (1,233.7\text{tf}) - 4,181.6\text{MN} (426.4\text{tf}) = 7.92\text{MN} (807.3\text{tf})$$

増加している。基本的にはバラストの調整により、計画喫水を保持するものとする。

5.2.4 実機の係留系の評価

設計した実機の係留は、模型実験での設定に対して係留本数と初期張力が異なる。これらは、係留系の固有周期に影響を及ぼすため、実機と模型の差異について検討を行った。

Heaveの固有周期は、次式で求めると0.46s(実機換算2.9s)である。

$$\text{余剰浮力} (\text{初期張力} \times 4) : 255.0\text{N} (26.0\text{kgf})$$

$$\text{排水量} : 59.30\text{MN} (6,047\text{tf})$$

↓ 模型換算(海水比重を考慮)

$$904.0\text{N} (92.18\text{kgf})$$

$$\text{重量} : \text{排水量} - \text{余剰浮力} = 649.0\text{N} (66.18\text{kgf})$$

$$T = 2\pi (m/k)^{0.5}$$

$$k = n(EA/L) + 4\rho_w A_w$$

$$E = 68.6\text{MN/mm}^2 (7,000\text{kgf/mm}^2)$$

$$A = 1.13\text{mm}^2 (\text{実験のワイヤー})$$

$$L = 25\text{m} (\text{索長})$$

$$n = 4\text{本} (\text{係留ワイヤー本数})$$

$$m = 649.0\text{N} (66.18\text{kgf}) \times 1.1/9.80665 (\text{付加質量を質量の10\%とした。})$$

$$A_w = 0.0225\text{m}^2 (\text{カラム1本の水線面積})$$

$$\rho_w = 9.81\text{kN/m}^3 (1,000\text{kgf/m}^3)$$

(単位体積当たりの水の重量)

また、前節で検討したワイヤーで以下のように固有周期を求めると1.6sである。

$$\text{排水量} : 59.30\text{MN} (6,047\text{tf})$$

$$\text{余剰浮力} (\text{初期張力} \times 4) : 48.4\text{MN} (4,934.8\text{tf})$$

$$\text{重量} : \text{排水量} - \text{余剰浮力} = 10.91\text{MN} (1,112.2\text{tf})$$

$$T = 2\pi (m/k)^{0.5}$$

$$k = n(EA/L) + 4\rho_{\text{sea}} A_w$$

$$E = 68.6\text{MN/mm}^2 (7,000\text{kgf/mm}^2)$$

$$A = 7,400\text{mm}^2 (\phi 120\text{mmのワイヤー})$$

$$L = 1,000\text{m} (\text{索長})$$

$$n = 36\text{本} (\text{係留ワイヤー本数})$$

$$m = 10.91\text{MN} (1,112.2\text{tf}) \times 1.1/9.80665$$

(付加質量を質量の10%とした。)

$$A_w = 36\text{m}^2 (\text{カラム1本の水線面積})$$

$$\rho_{\text{sea}} = 10.05\text{kN/m}^3 (1,025\text{kgf/m}^3)$$

(単位体積当たりの水の重量)

表5-1 実機と模型実験の固有周期の比較

固有周期の動揺モード	模型実験(実機換算値)	実機係留
Heave	0.46 s (2.9 s)	1.6 s
Surge	22.4s (142 s)	30.1 s

Surge の固有周期は下の式で計算した。なお、浮力は実験で吃水に対する 20 %の引き込みを行ったため、重量の 1.2 倍とした。ワイヤーの水中重量を無視すれば、

$$\text{索長 } l = 25\text{m}$$

$$T = 2\pi(l/0.2g)^{0.5}$$

より、実験での固有周期は 22.4s (実機換算値 141.7s) である。ここで、0.2g は余剰浮力であり、g は重力加速度である。不規則波中実験などに 20 ~ 30s の長周期成分があることから妥当な値と考えられる。また、Surge の固有周期は、余剰浮力と索長で決まるので、係留するワイヤーの数が増えても影響は少ないと考えられる。しかし、前節の検討では、ワイヤーの本数の増加による海水中重量の増加分を余剰浮力に加えており、排水量は一定としているためシステムの重量が小さくなり、影響があると考えられる。

実機重量 : 10.91MN (1,112.2tf)

余剰浮力(必要初期張力 × 4): 48.4MN (4,934.8tf)

排水量 (浮力): 59.30MN (6,047tf)

59.30MN (6,047tf) / 10.91MN (1,112.2tf)

= 約 5.44 倍

余剰浮力分は 4.44g、索長 l は 1,000m、 $T=2\pi(l/4.44g)^{0.5}$ より、固有周期は 30.1s である。

表 5-1 に検討した固有周期をまとめた。

実機重量 : 10.91MN (1,112.2tf)

余剰浮力(必要初期張力 × 4): 48.4MN (4,934.8tf)

排水量 (浮力): 59.30MN (6,047tf)

59.30MN (6,047tf) / 10.91MN (1,112.2tf)

= 約 5.44 倍

・ Surge 固有周期 : 模型実験に比べ、固有周期は短くなっている。ただし、波周期よりも非常に長く、波周期との同調影響は小さい。

・ Heave 固有周期 : 模型実験に比べ、1.3 秒程度、固有周期は短くなっており、波周期との同調影響が現れる可能性は少なく、テンションレグ係留の特徴により Heave 運動が非常に小さく、動揺に与える影響は小さいと考えられる。

以上の考察から、実機係留は模型実験の設定に対し、動揺に対する影響が小さいと考えられる。

表 5-2 リチウム採取システムの主要寸法および重量概算値

支持浮体高さ	56.5	m
支持浮体幅	30	m
支持浮体長さ	30	m
支持浮体喫水	41	m
支持浮体シリンダ部高さ	23.5	m
支持浮体シリンダ内幅	20	m
支持浮体シリンダ内長さ	20	m
支持浮体上部機械室高さ	3	m
支持浮体排水量	13,700	t
係留初期張力	4,950	t
軽荷重量+バラスト水 (軽荷重量には、吸着剤を含む)	8,750	t
鋼材重量概算値	6,000	t
フロート部高さ	4	m
フロート部幅	20	m
フロート部長さ	20	m
フロート部喫水	2	m
フロート部排水量	820	t
鋼材重量概算値	200	t
ピストンロッド直径	1	m
ピストンロッド長さ	28.5	m
鋼材重量概算値	100	t
逆止弁部高さ	2	m
逆止弁部幅	19	m
逆止弁部長さ	19	m
逆止弁部板厚 (補強材を含む)	0.05	m
鋼材重量概算値	200	t
総鋼材重量	6,500	t

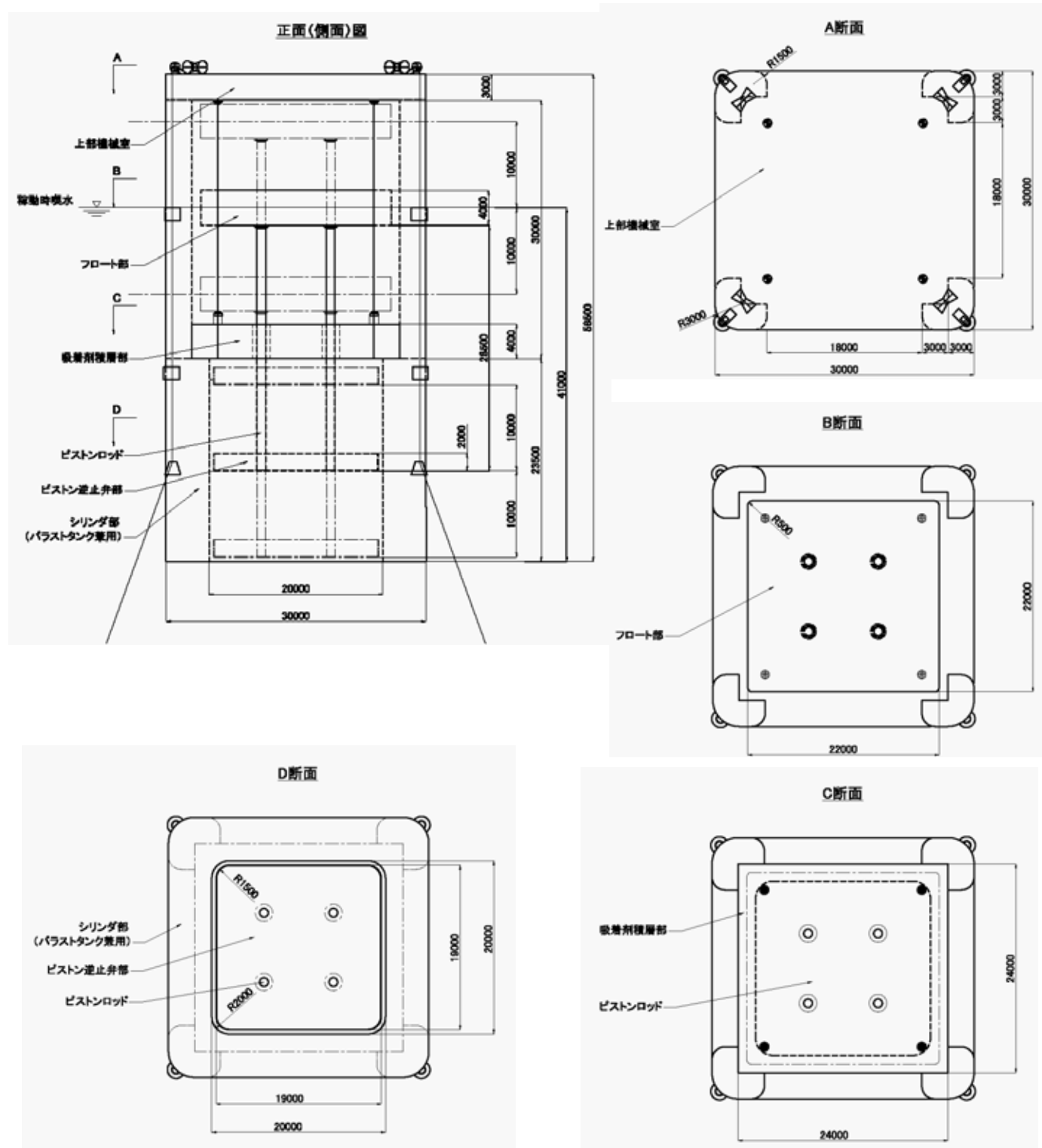


図 5-1 浮体式海水中リチウム採取システム全体図

5.2.5 実機の係留系の費用

係留ワイヤーは合計 36 本必要であり、ワイヤー長は水深分の 1,000m とする。なお、アンカーに必要なコンクリートの水中重量は、アンカー点設計張力より求めた。リチウム採取システム 1 基当たりの係留系の費用^{9)、10)}は以下のとおりである。

ワイヤー：130,000 千円 × 36 本
 = 4,680,000 千円（約 47 億円）
 アンカー：7,164tf × 4 = 28,656tf
 コンクリート製 716,400 千円（7.2 億円）
 合計 5,396,400 千円（約 54 億円）
 設置費：50,000 千円（5 千万円）

5.3 リチウム採取システム全体の排水量および重量

本装置の係留初期張力は約 4,950t である。この力とバランスするだけの予備浮力が必要である。また、軽荷重量と安定性を生み出すためのバラスト水に見合った浮力が必要である。これらの関係は下記のようになる。

初期状態での排水量

軽荷重量 + バラスト水重量 + 係留初期張力
 軽荷重量は約 6,500t、バラスト水は約 2,250t、係留初期張力は約 4,950t とすれば、初期状態での排水量は 13,700t 必要となる。

以上の検討を踏まえた浮体式海水中採取システムの概略全体図を図 5-1 に示す。また、主要寸法および重量概算を表 5-2 に示す。

6. 浮体式海水中リチウム採取システムによるリチウム採取プロセスの概念および経済性の検討

6.1 リチウム吸着技術

6.1.1 リチウム吸着剤の開発状況

海水リチウムの吸着・脱着については、独立行政法人産業技術総合研究所四国センターにおいて技術開発が進められている。

産業技術総合研究所四国センターでは、研究を進めた結果、高性能の吸着剤としてイオンふるい吸着剤の開発に成功した。リチウムイオンに適合する鑄型が内部に形成され、その鑄型にリチウムだけが特異的に取り込まれることを特徴とした極めて斬新なものである。固相反応法で合成した $\text{Li}_{1.33}\text{Mn}_{1.67}\text{O}_4$ の組成を有するスピネル型マンガン酸化物を酸処理して得られるイオン交換型吸着剤 ($\text{MnO}_2 \cdot 0.31\text{H}_2\text{O}$) は、海水から吸着剤 1g あたり 20mg のリチウムを吸着する性能を有し、世界で最高レベルにある。

この吸着剤を用いた海水からのリチウム採取システムでは、得られるリチウム化合物のコスト見積が

市場価格の 2 倍以上と高いことや、吸着剤を繰返し使用するには化学的安定性が十分でないなどの問題がある。このような背景のもとで、海水からのリチウム採取の実用化をめざして、2 倍以上の吸着容量をもち、化学的に安定な吸着剤の開発を目標として、平成 10 年度から工業技術院競争特研「海水リチウム採取用特異的イオンふるい吸着剤の創製」が行なわれている。

$\text{Li}_{1.33}\text{Mn}_{1.67}\text{O}_4$ の組成式から理論値として最大 55mg/g のリチウム吸着量が計算されるが、海水が弱アルカリ性であることから十分な吸着性能を発揮できない。これらの弱点を改善し、高効率で吸着速度の速い高性能吸着剤の開発が進められている。水熱反応法で得られる斜方晶 LiMnO_2 を加熱処理して $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$ 立方晶マンガン酸化物が得られる。これを酸処理するとリチウムイオンの鑄型が形成され、リチウム選択的吸着剤 ($\text{MnO}_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) が得られる。

この新しい吸着剤の吸着容量は 52mg/g と非常に高い。この吸着剤を用いた海水からの吸着試験では 40mg/g であった⁸⁾。

6.1.2 リチウム吸着剤の性能想定

海水からのリチウム採取に関するフィージビリティスタディでは、リチウム吸着剤の吸着性能に関して様々な数値が使われている。現状技術に基づいた安全サイドの想定では吸着日数 30 日で 16mg/g ~ 20mg/g という数値が使われている。

上記の最新の技術では 40mg/g という数値が出ているが、実用化する場合は成形時に接合剤として PVC（ポリ塩化ビニール）を 20% 程度添加することになり、結果的には 30mg/g 程度となると予想される。信川の検討例³⁾では 32.9mg/g という数値が使われている。

吸着日数については従来の吸着剤では 30 日程度としているが、現在開発中の吸着剤では 10 日程度の高速吸着を想定している。

今回の検討では、吸着剤をメッシュで囲まれた積層部に入れ、波力ポンプによる海水流入で流動床として扱うため、直径 20mm 程度の粒子状の吸着剤を用いることとする。この径での吸着剤の性能については実験データが未だないが、吸着剤がこれからも技術開発を期待できるとし、吸着剤の性能を下記のように想定した。なお、吸着日数 10 日の場合の吸着率は、信川の試験結果を参考に吸着日数 30 日の場合の 80% と想定した。

・標準ケース

吸着日数 30 日の場合：吸着率 16mg/g

吸着日数 10 日の場合：吸着率 12.8mg/g

・将来ケース

吸着日数 10 日の場合：吸着率 26.3mg/g

6.2 リチウム脱着技術

海水リチウム吸着後、吸着剤は酸によりリチウムを脱着する。酸としては一般に塩酸が使用される。脱着されたリチウム溶液はアルカリ（水酸化ナトリウム）を加え中和するとともに不純物を析出除去する。この溶液は濃縮装置で濃縮され、その後、炭酸塩を加え結晶化沈殿させ、炭酸リチウムの形で採取する。これらのプロセスの中で最も留意すべき点は、塩酸や水酸化ナトリウムなど、強酸や強アルカリが使われることである。これらを使用する反応槽は耐酸・耐アルカリ材料あるいはコーティングが要求される。

本プロセスでは吸着剤や様々な塩類などの固体成分と液体成分を分離する固液分離装置や濾過装置が多く使用される。これらのプロセスに必要な個々の要素技術は既に実用化されている。

6.3 リチウム採取のプロセスとその構成

図6-1に浮体式海中リチウム採取システムを用いたリチウム採取プロセスの全体を示す。システムは以下の主要サブシステムで構成される。

1) 浮体式リチウム採取システム

(吸着剤積層部)

浮体式リチウム採取システムに装備する。吸着剤を約2mの厚さで敷き詰めた流動床であり、その吸着剤中をリチウムを含有した海水を波力ポンプで大量に供給する。海水は、波力ポンプピストン下降時に逆止弁部からピストン上部に入りピストンにより押し上げられ積層部を通過し海中へ流れ出る。吸着剤は見掛け比重0.3、真比重1.3程度の非常に軽い物質である。流動層の周囲をメッシュで囲む。メッシュが海洋生物により目詰まりすることがないようにメッシュサイズを大きくする必要がある。そのため吸着剤は粒径20mm程度のペレット状にして用いる。海水の流れにより流動床が舞い上がることにより海水と吸着剤の接触時間を長くすることを狙っている。

2) 吸着剤輸送船

(吸着剤移送装置)

吸着剤積層部は浮体式海中リチウム採取システムの中央部にはめ込まれており、10日から1ヶ月に1度、積層部内の吸着剤を吸着剤輸送船の脱着槽へ全量移動する。移動した後、吸着剤輸送船が運んできた脱着処理後の吸着剤を吸着剤積層部へ積み込む。吸着剤積層部と吸着剤輸送船の間の吸着剤移送は、浮体式採取システム側に常時装備するフローティングホースを介し、輸送船装備のスラリーポンプで行う。吸着剤輸送船は、吸着剤336tを一時的に2セット(672t)積むことになり、航行距離は500km(関東～紀伊水道沖100km)である。さらに、吸着した

リチウムと積み替えに必要な機材の重量を考慮し、載荷重量1,100tの輸送船とする。要目を表6-1に示す。この輸送には、関東から紀伊水道沖100km海域まで約1日(500km/11.3kt=23.9h)かかる。

従って、1サイクルあたりの作業日数は3日(往復約2日+現場作業1日)となる。また、運行および現場の作業に携わる船員は15名とし、運行費用や燃料費は文献9)、10)を参考にする。

3) リチウム脱着・結晶化システム(陸上)

(脱着槽)

リチウムを吸着した吸着剤を収容し、そこに希塩酸を注入しリチウムを脱着する。脱着槽は輸送船で1回で運んだ吸着剤を全量受け入れ処理できるよう1700m³のタンクとして陸上に作る。また、強酸を槽内で用いるため、タンク内は全面耐酸コーティングする。

(中和槽)

脱着液を収容し、そこに水酸化ナトリウム(強アルカリ)を注入し、中和処理するとともに、不純物を塩として析出させる。中和槽は輸送船が1回で運んだ吸着剤から分離されたリチウムを全量受入処理できるよう225m³とする。強アルカリを槽内で用いるため、タンク内は全面耐アルカリコーティングする。

(濃縮装置)

中和処理した脱着液を収容し、水分を除去し濃縮する。エネルギー消費がほとんどないヒートポンプ利用の濃縮装置の採用も有力な候補である。この装置では、一旦熱サイクルが回り出すと、原理的にはエネルギーの供給なしで回り続ける。

(結晶化槽)

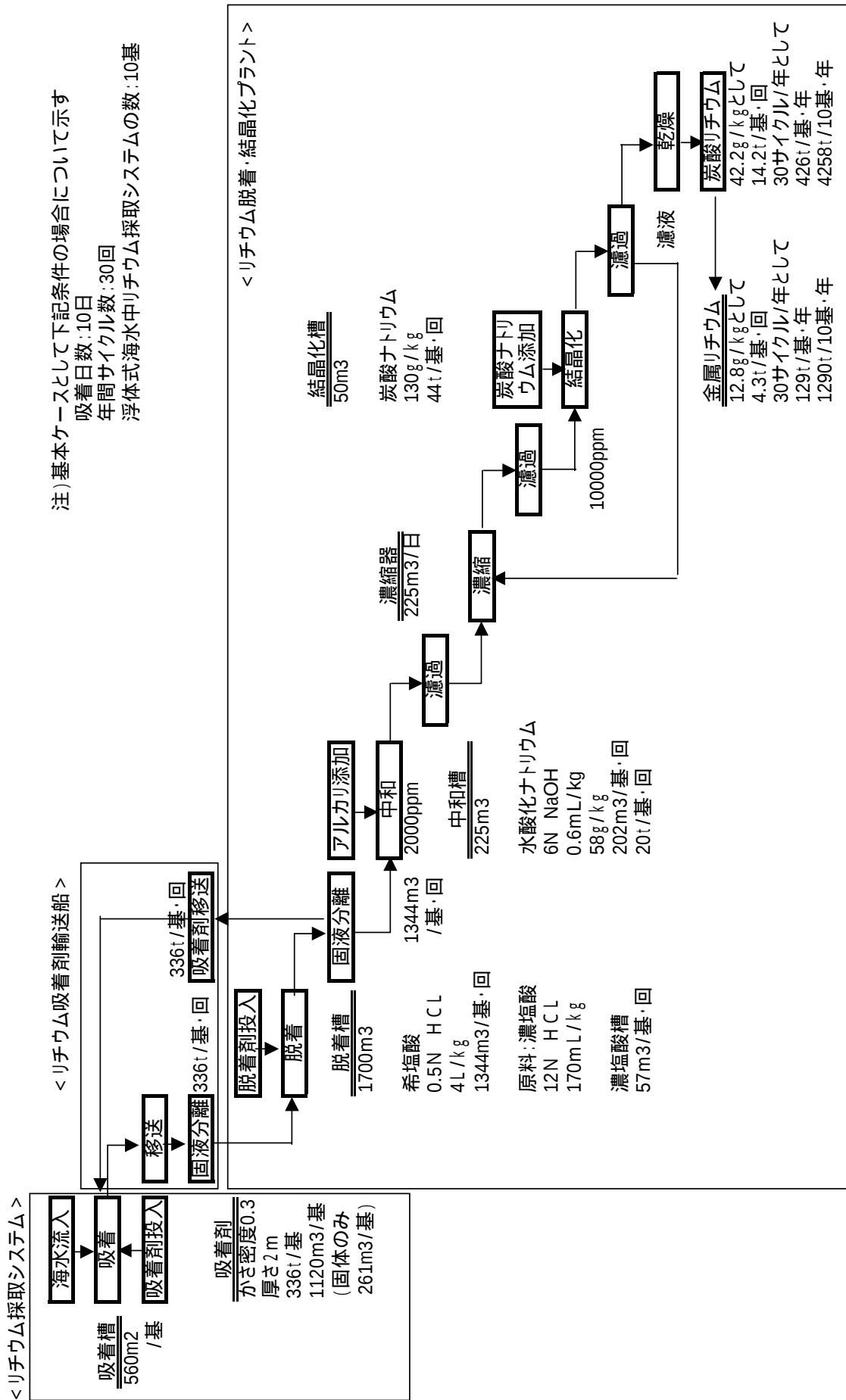
濃縮した脱着液を収容し、炭酸ナトリウムを注入し、炭酸リチウムを結晶化させる。結晶化槽は50m³とする。

(乾燥装置)

結晶化した炭酸リチウムを乾燥する。本システムの最終製品は炭酸リチウムである。

表6-1 リチウム吸着剤輸送船の主要目

船長 Lpp	46.5 m
船幅 B	9.4 m
型深さ D	4.15 m
吃水 d	4.06 m
載荷重量	1,100 t
主機馬力	1,000 PS
船速	11.3 kt



注) 基本ケースとして下記条件の場合について示す
吸着日数:10日
年間サイクル数:30回
浮体式海水中心リチウム採取システムの数:10基

図 6-1 浮体式海水中心リチウム採取システムによるリチウム採取プロセス

表6-2 浮体式海中リチウム採取システムの経済性検討

項 目	単 位	標準ケース			将来ケース
		30日吸着	10日吸着	10基稼動	
吸着槽長さ	m	24.0	24.0	24.0	24.0
吸着槽幅	m	24.0	24.0	24.0	24.0
吸着槽面積	m ²	560	560	560	560
吸着剤厚さ	m	2	2	2	2
吸着剤体積	m ³	1,120	1,120	1,120	1,120
吸着剤かさ比重		0.30	0.30	0.30	0.30
吸着剤重量/基	t	336	336	336	336
吸着剤年間延べ使用量/基	t	3,360	10,080	10,080	10,080
吸着剤吸着率	mg/g	16.0	12.8	12.8	26.3
吸着日数	日	30	10	10	10
年間サイクル数	回	10	30	30	30
炭酸リチウム生産量/年・基	t	177	426	426	875
リチウム生産量/年・基	t	54	129	129	265
採取浮体数	基	1	1	10	100
炭酸リチウム生産量/年	t	177	426	4,258	87,484
リチウム生産量/年	t	54	129	1,290	26,510
吸着剤単価	¥/kg	700	700	700	700
吸着剤総額	億円	2.4	2.4	23.5	235.2
吸着剤取り替え間隔	cycle	50	50	50	100
吸着剤取り替え費用	億円	0.5	1.4	14.1	70.6
脱着液コスト	¥/吸着剤 t	3,000	3,000	3,000	3,000
アルカリ液コスト	¥/吸着剤 t	6,000	6,000	6,000	6,000
晶析処理液コスト	¥/吸着剤 t	5,000	5,000	5,000	5,000
脱着～晶析年間コスト	億円	0.5	1.4	14.1	141.1
吸着剤+脱着処理液 年間コスト	億円	0.9	2.8	28.2	211.7
吸着剤+脱着処理液 年間コスト/リチウムkg	円	1,750	2,188	2,188	798
炭酸リチウム単価/kg	円	300	300	300	300
年間売上	億円	0.5	1.3	12.8	262.5
固定費					
Fa: 吸着剤費	億円	2.4	2.4	23.5	235.2
Fs: 海水リチウム浮体システム (F1+F2+F3+F4)	億円	120	120	746	5,520
F1: 浮体 (構造重量6500t/基)	億円	33	33	260	1,950
F2: 係留システム	億円	55	55	440	3,300
F3: その他、艀装品	億円	2	2	16	120
F4: 陸上脱着・結晶化処理プラント	億円	30	30	30	150
年間運転費Y=C1+C2+C3+C4+C5	億円	2.2	4.3	35.1	260.7
C1: 吸着剤補給費	億円	0.5	1.4	14.1	70.6
C2: 浮体補修費 (Fs×2%)	億円	0.7	0.7	5.2	39.0
C3: 吸着剤輸送費	億円	0.09	0.29	1.1	8.0
C4: 人件費	億円	0.5	0.5	0.5	2.0
C5: 脱着～晶析年間コスト	億円	0.5	1.4	14.1	141.1
年間コスト					
固定費総額 (Fa+Fs)	億円	122	122	770	5,755
設備償却機関	年	20	20	20	20
金利	%	2.5	2.5	2.5	2.5
資本比率 (年毎支払金額/固定費総額)	%	6.4	6.4	6.4	6.4
F: 年間固定費	億円	7.8	7.8	49.2	368.3
Y: 年間運転費	億円	2.2	4.3	35.1	260.7
C: 年間総コスト (F+Y)	億円	10.0	12.1	84.3	629.0
リチウム1kg当たりコスト: Cab	円/kg	18,569	9,348	6,534	2,373
炭酸リチウム1kg当たりコスト	円/kg	5,627	2,833	1,980	719

6.4 システム全体の規模と採算性

炭酸リチウムはリチウムイオン電池の原料として急激に需要が伸びている。リチウムは世界的に偏在しており、日本では全量を輸入に頼っている。1997年の日本の炭酸リチウム輸入量は5,927tであったが、これが2010年には年間4万t程度になるという予測がある。最近の産業界のIT関連の開発の急速な進展、リチウムを使った新型電池の開発競争が激しくなってきたことなど、これらの需要予測を遥かに超える気配もある。この年間4万tのリチウムの半分程度を将来的には海水から採取するシステムを検討する。

本研究では、1基あたり約300tの吸着剤を搭載できる浮体式海水中リチウム採取システムを基本単位として、システム全体の規模および経済性を検討する。下記のとおり、各パラメータを標準ケース（現状の技術でほぼ実現できる）と将来ケース（今後の技術開発により達成可能と予測できるレベル）の2種類にして検討を行った結果を表6-2に示す。

・標準ケース

吸着日数：30日 および 10日
 吸着剤吸着率：吸着日数30日で16mg/g
 吸着日数10日で12.8mg/g
 年間サイクル数：10回 および 30回
 採取浮体数：1基 および 10基

・将来ケース

吸着日数：10日
 吸着剤吸着率：吸着日数10日で26.3mg/g
 年間サイクル数：30回
 採取浮体数：100基

標準ケースでは、リチウム採取浮体を10基稼動する場合、年間1,290tのリチウム採取が可能である。年間の総コストは84.3億円と試算され、炭酸リチウム1kg当たりのコストは1,980円となる。現在輸入している炭酸リチウムの単価は約300円/kgであり、輸入品と比べると価格的には競争力がない。一方、将来ケースでは下記の改善を想定している。

- ・ 吸着効率の高い吸着剤が開発される
- ・ 大量の採取システムが投入される
- ・ 量産効果と習熟効果で浮体および係留システムの固定費を低減できる
- ・ プラント大型化で陸上プラント固定費を低減できる

ここでは、基本単位の吸着剤約300tのリチウム採取浮体を100基投入するものとして検討を行った。リチウム換算で年間2.65万t、炭酸リチウム換算で年間8.75万tの生産が可能となる。年間総コストは約630億円と試算され、炭酸リチウム1kg当たりのコストは約720円となる。

7. まとめ

本研究では、海洋エネルギーを利用した全天候型の浮体式海水中リチウム採取システムの開発を目的として、流動床発生装置とそれを支える係留浮体から構成されるリチウム採取システムを提案するとともに、その実用化に向けた技術開発を行った。また、当所の深海域再現水槽において総合性能評価試験を実施し、得られた計測結果を基にリチウム採取システムの概念設計およびリチウム採取コスト算出による経済性評価を行った。本研究においては、提案したリチウム採取システムを水深1,000mの黒潮の中に設置することを想定したため設計条件としては厳しくなり、特に係留系の概念設計において安全率を大きく設定する必要があった。今後は、リチウム採取システムの設計条件を下げることで可能な海域における稼動を考慮すると同時に、係留および係留浮体の更なる合理化、そして将来的にリチウム吸着剤の高性能化を図ることができれば、本研究で検討を行った結果に比べて、リチウム採取コストを十分に低減させることが可能であると考えられる。

謝 辞

本研究はNEDOの産業技術研究助成事業費により平成12年度から14年度までの3年間で実施させて頂きました。本研究の実施に多大のご支援を頂きましたNEDOの関係者各位に深く感謝の意を表します。また、水槽試験でご協力頂きました当所重点支援研究員の久松勝久氏と佐伯延博氏、リチウム採取システムの概念設計およびコスト算出による経済性の検討でご協力頂きました三井造船昭島研究所と石川島播磨重工業（株）の関係者各位、そして、本研究を実施する上で必要な情報等をまとめて頂きました三菱重工業（株）、（株）海洋開発技術研究所、日立造船（株）の関係者各位にも感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西山 孝：鉱物資源の現状、アルム出版社（1989）
- 2) 宮井良孝、加納博文、大井健太：マンガン酸化物系吸着剤による海水からのリチウム採取、四国工業技術研究所報告 第28号（1999）
- 3) 信川 寿、北村 充、周 国強、小田 薫、大井健太：海水中に溶存するリチウム採取システムについて、日本造船学会論文集、第183号（1998）、pp.309-313
- 4) 大井健太：海水からのリチウム採取技術の開発（1）リチウム吸着剤、日本海水学会「“海”・資源の利用と課題」特集号、第51巻 第5号 別

- 冊 (1997)、pp.285-288
- 5) 渡辺 巖、富田 宏、谷澤克治：北太平洋の波と風 (1974～1988), 船舶技術研究所報告, 別冊第14号 (1992) (URL = <http://www.nmri.go.jp/wavedb/wave2.html>)
- 6) 海洋速報&海流推測図 (URL = <http://www1.kaiho.mlit.go.jp>)
- 7) 田村兼吉、渡辺喜保、安藤裕友、前田克弥、久松勝久、佐伯延博：深海水槽について、平成14年度 (第2回) 海上技術安全研究所 研究発表会講演集 (2002)、pp.49-52 (URL=<http://www.nmri.go.jp/ocean/DeepSeaBasen/index.htm>)
- 8) 加納博文：海水リチウム採取のための高性能吸着剤の開発、工業技術 Vol.41 No.3 (2000)、pp.11-13
- 9) 社団法人 日本機械工業連合会、社団法人 日本海洋開発産業協会：平成12年度 新規産業創出のための海洋資源・エネルギー複合的活用事業に関する調査研究報告書 - 海洋産業技術戦略策定を目指して - (2001)
- 10) 社団法人 日本機械工業連合会、社団法人 日本海洋開発産業協会：平成13年度 海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究報告書 - 風力発電を核とする大規模浮遊式洋上エネルギー供給システムの実現性に関する調査研究 (2002)